

# Werkstoffermüdung - wissenschaftliche und technische Aspekte

Zenner, Harald

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1995 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.97-105



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HARALD ZENNER, Clausthal-Zellerfeld

## **Werkstoffermüdung – wissenschaftliche und technische Aspekte**

Braunschweig, 10. November 1995\*

### **1. Bedeutung der Werkstoffermüdung**

Gebrauchsgegenstände, Bauteile, Strukturen, Fahrzeuge und Maschinenanlagen haben eine begrenzte Lebensdauer, was im Bewußtsein der Leute allgemein akzeptiert wird. Zu einer Begrenzung der Lebensdauer können unterschiedliche Prozesse führen, wie Korrosion (volkswirtschaftlich am wichtigsten), Verschleiß, Werkstoffermüdung, Kriechen, Überlastung und Alterung. Diese Prozesse können auch gleichzeitig auftreten. Das Kriterium dafür, daß die Grenze der Lebensdauer erreicht ist, ist die Nichterfüllung bzw. Beeinträchtigung der Funktion (Bruch, Anriß, bleibende Verformung) oder eine mögliche Gefährdung aufgrund verminderter Sicherheit (Anriß).

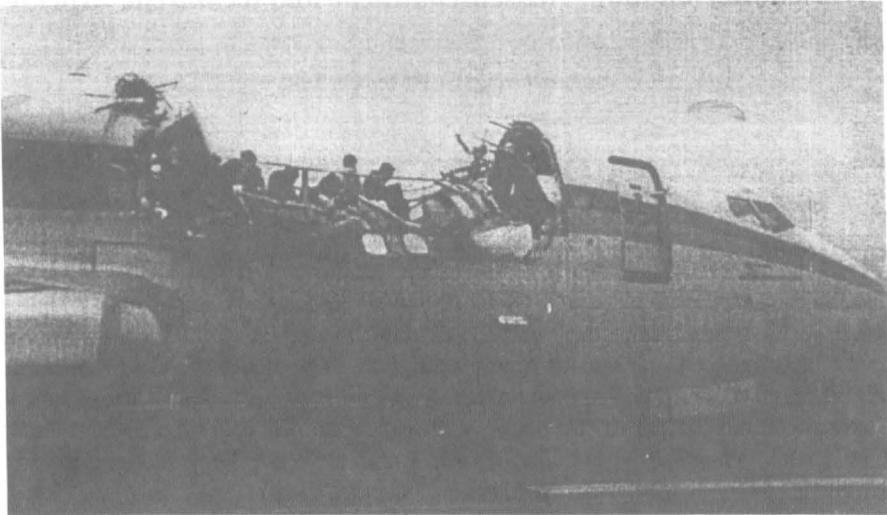
Für Schäden, die aufgrund von Ermüdung stehen, ist es z.B. im Gegensatz zu Korrosionsschäden (Ausnahme Spannungsrißkorrosion) charakteristisch, daß sie ohne Vorwarnung auftreten und zu katastrophenartigem Versagen führen können. Spektakulär waren z.B. zwei Abstürze der De-Havilland Comet, 1954, des ersten Verkehrsflugzeuges mit Strahlantrieb, der Untergang der Bohrplattform Alexander L. Kielland, 1980, und die Bruchlandung einer Boing 737 der Aloha Airlines, 1988, Bild 1. Schäden dieser Art lösen stets eine rege Forschungsarbeit aus. Das Bersten der Flugzelle im letzten Beispiel erfolgte trotz der im Flugzeugbau angewandten fail safe-Auslegungsphilosophie, die ein ausfallsicheres Versagen durch mehrere Lastpfade und die Verwendung schadens-toleranter Werkstoffe erreichen will. Nach langer Lebensdauer können in einer Struktur, hier Nietlöcher, Anrisse entstehen. Die Auswirkung einer großen Zahl von Anrissen, multi site damage, auf das Strukturverhalten war bisher nicht ausreichend berücksichtigt worden.

Das Fachgebiet, das sich mit der Auslegung von Komponenten gegen Ausfall durch Ermüdung befaßt, ist die Betriebsfestigkeit. Nur selten geht es darum, Komponenten dauerhaft auszulegen, d.h. für eine beliebig lange Zeit. Vielmehr ist das Ziel der Betriebsfestigkeit die sichere und ökonomische Auslegung für eine begrenzte Nutzungsdauer. Im Mittelpunkt dieses Fachgebietes steht die Forderung nach Leichtbau, um

- die Funktion zu erfüllen (z.B. Fliegen beim Flugzeug),
- die Nutzlast zu erhöhen (z.B. Nutzfahrzeug, da das Gesamtgewicht gesetzlich festgelegt ist),

---

\* Zusammenfassung eines Vortrages vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweiger Wissenschaftlichen Gesellschaft.



*Bild 1:  
Gelandete Boeing 737 der Aloha Airlines*

- den Energieverbrauch (Treibstoff) zu vermindern (z.B. Pkw beim Bremsen und Beschleunigen im Stadtverkehr),
- Werkstoff einzusparen (z.B. im Anlagenbau).

Die Idee der Betriebsfestigkeit stammt aus dem Flugzeugbau (Ernst Gaßner, 1938). Sie hat in den vergangenen Jahrzehnten im gesamten Fahrzeugbau große Bedeutung erlangt und wird heute z.B. auch im Behälterbau und im Schwermaschinenbau angewendet.

## **2. Ermüdung des Werkstoffes**

An einem einfachen Beispiel, wie dem wiederholten Hin- und Herbiegen eines Drahtes, läßt sich das Ergebnis der Ermüdung zeigen: Der Draht wird bei ausreichendem Ausschlag der Biegung nach einer bestimmten Anzahl von Wiederholungen brechen. Hieraus ergeben sich grundlegende Erkenntnisse:

- Der Werkstoff kann bei Beanspruchungen versagen, die weit unter der statischen Festigkeit liegen, wenn diese wiederholt auftreten und
- das Versagen wird um so schneller erfolgen, je größer die Amplitude der Beanspruchung ist.

Dieser Vorgang ist reproduzierbar, d.h. gleiche Proben werden bei einer gleichen Folge von Beanspruchungen, von einer „natürlichen“ Streuung im Versuch einmal abgesehen, nach der gleichen Schwingenspielzahl brechen. Wie diese Schädigung und Akkumulation von Schädigungen genau abläuft, ist Gegenstand jahrzehntelanger Forschung.

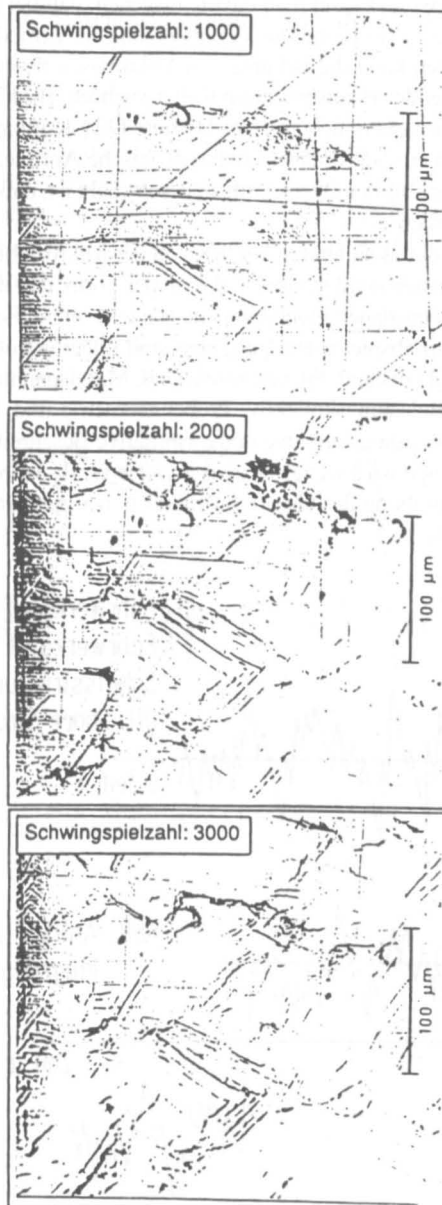


Bild 2:  
Mikrorißentstehung und -wachstum Stahl CK 15,  
Biegung und Torsion, phasenverschoben

Nach heutigem Wissensstand kann man davon ausgehen, daß bei duktilen Werkstoffen eine (mikro-)plastische Verformung die Voraussetzung für Ermüdung ist. Bereits nach wenigen Schwingspielen kann die Bildung von Mikrorissen beobachtet werden. Diese können unter schwingender Beanspruchung weiterwachsen, Bild 2, und sich verbinden (Koaleszenz), sie können aber auch an einer Barriere (z.B. Korngrenze) stehen bleiben. Schließlich bilden sich ein oder mehrere makroskopische Anrisse, die stabil fortschreiten, sich ggf. vereinigen, bis der Querschnitt so geschwächt ist, daß instabiles Rißwachstum auftritt, d.h. der Bruch.

Eine Beschreibung der ablaufenden Stadien von der Mikrorißbildung bis zum Bruch ist bisher noch nicht ausreichend gelungen, d.h. in der Form, daß daraus eine werkstoffkundlich fundierte Lebensdauerberechnung für Bauteile unter Betriebsbeanspruchung möglich wäre. Die sich abspielenden Vorgänge sind außerordentlich komplex, wobei neben Werkstoffart und -zustand, Spannungszustand, Mittelspannung, Beanspruchungsart, Belastungsfolge, Belastungskollektiv, Probengeometrie und Temperatur wesentliche Einflußgrößen sind. Eine qualitative und quantitative Beschreibung der beobachtbaren Schädigungsvorgänge wird weiter Gegenstand der Werkstoffforschung bleiben, wobei das Ziel der Beschreibung des Gesamtprozesses höher zu werten ist als das Auffinden spezifischer Details.

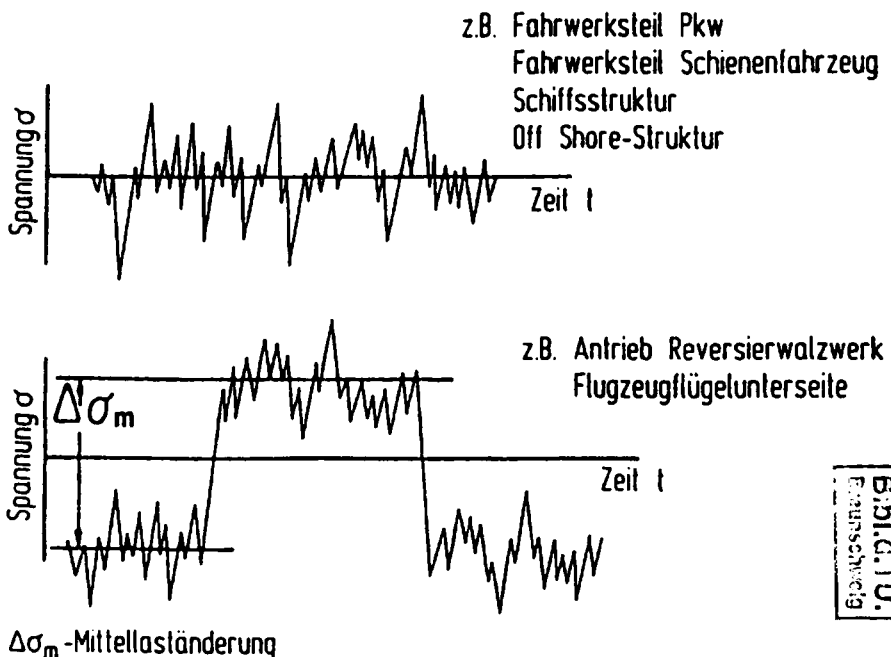
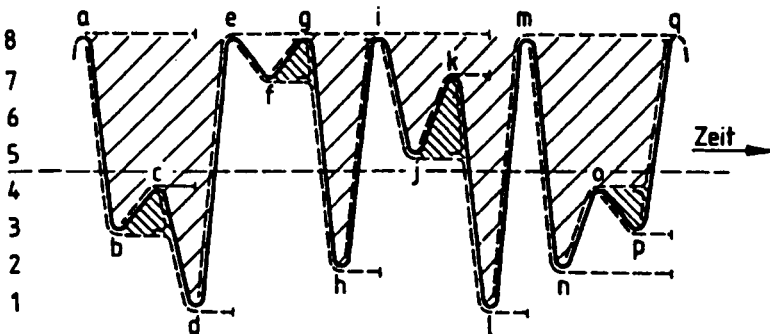


Bild 3:  
Charakteristische Beanspruchungszeitfunktionen bei Betriebsbeanspruchung

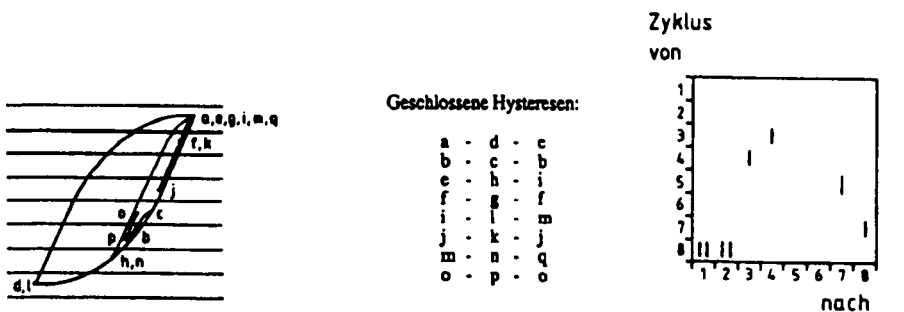
### 3. Betriebslasten und Lastannahme

Bauteilbeanspruchungen sind, wie Betriebsmessungen zeigen, in der Regel zeitlich veränderlich. Typisch sind Zufallsfunktionen (Random), wie sie bei Flugzeugen durch Böen, bei Straßenfahrzeugen durch die Fahrbahn und bei Schiffen durch Seegang entstehen, Bild 3. Charakteristisch können quasistatische Mittellaständerungen sein.

Um diese Betriebsbelastungen, d.h. Beanspruchungszeitfunktionen mit veränderlicher Amplitude, für eine Lebensdauerabschätzung nutzbar zu machen, erfolgt unter Informationsverlust (Reihenfolge, Frequenz, Schwingungsform) eine Transformation in den Häufigkeitsbereich (Häufigkeitsverteilung der Amplituden). Als Zählverfahren für diese Klassierung der Beanspruchungszeitfunktion wird heute das rainflow counting verwendet, Bild 4. Gezählt werden die geschlossenen Hysteresen, die sich in einem



Schraffierte Flächen sind Hysteresen



Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Rainflow-Matrix

Bild 4:  
Rainflow-Zählung einer Beanspruchungszeitfunktion

Spannungs-Dehnungs-Diagramm für eine bestimmte Beanspruchungszeitfunktion ergeben. Damit wird mit der Hysterese, die eine irreversible Arbeit darstellt, eine Verbindung zur Werkstoffschädigung hergestellt. Die Darstellung der Zählergebnisse erfolgt in einem Belastungskollektiv bzw. in einer Häufigkeitsmatrix.

Die Lastannahme zur Bemessung von Bauteilen, d.h. die Festlegung eines Bemessungskollektivs, ist bei vielen Anwendungen eine außerordentlich schwierige Aufgabe, einmal, weil z.B. bei Neukonstruktionen über die Beanspruchungen im Betrieb keine Erfahrungen vorliegen, zum anderen, weil die Einsatzbedingungen außerordentlich vielseitig sein können. Man denke zum Beispiel an einen Autotyp, der millionenfach weltweit zur Auslieferung kommt.

#### 4. Lebensdauerberechnung

Die rechnerische Lebensdauerabschätzung wird in der gegenwärtigen Situation, in der die Entwicklungszeiten mehr und mehr verkürzt werden, immer wichtiger. Grundsätzlich stehen drei Konzepte zur Verfügung:

- das Nennspannungskonzept (Lebensdauer bis Anriß oder Bruch)
- das Örtliche Konzept (Lebensdauer bis Anriß) und
- das Bruchmechanikkonzept (stabiler Rißfortschritt).

Die Treffsicherheit dieser Lebensdauerkonzepte und zahlreicher entwickelter Modifikationen ist bisher nicht befriedigend. Ein typisches Beispiel für den Vergleich zwischen berechneter und experimentell an Probestäben bestimmter Lebensdauer zeigt Bild 5. Im großen und ganzen ist bekannt, wo besondere Schwierigkeiten bei der Lebensdauerberechnung auftreten, so beim Erfassen von Einflüssen der Beanspruchungsreihenfolge, von Mittellastveränderungen, von Überlasten und vor allem bei zusammengesetzter Beanspruchung (zeitlich veränderlicher mehrachsiger Spannungszustand mit zeitlich veränderlicher Hauptspannungsrichtung). Hier besteht für die Zukunft wesentlicher Forschungsbedarf. In der Praxis behilft man sich häufig durch Anpassung der Rechnung an Versuchsergebnisse innerhalb eines begrenzten Anwendungsbereichs, d.h. durch eine sog. relative Lebensdauerabschätzung.

#### 5. Historisches

Ermüdungsschäden sind seit langem bekannt. Sie traten bereits bei Postkutschen auf und vor allem bei den ersten Eisenbahnfahrten, verbunden mit hohen Verlusten an Menschenleben. In etwa zwölfjähriger Arbeit (Veröffentlichungen zwischen 1858 und 1870) hat August Wöhler bei der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a.d. Oder methodisch Schwingversuche an Eisenbahnachsen durchgeführt, die zu wesentlichen Erkenntnissen, wie dem schädlichen Einfluß von Kerben auf die Schwingfestigkeit, geführt haben.

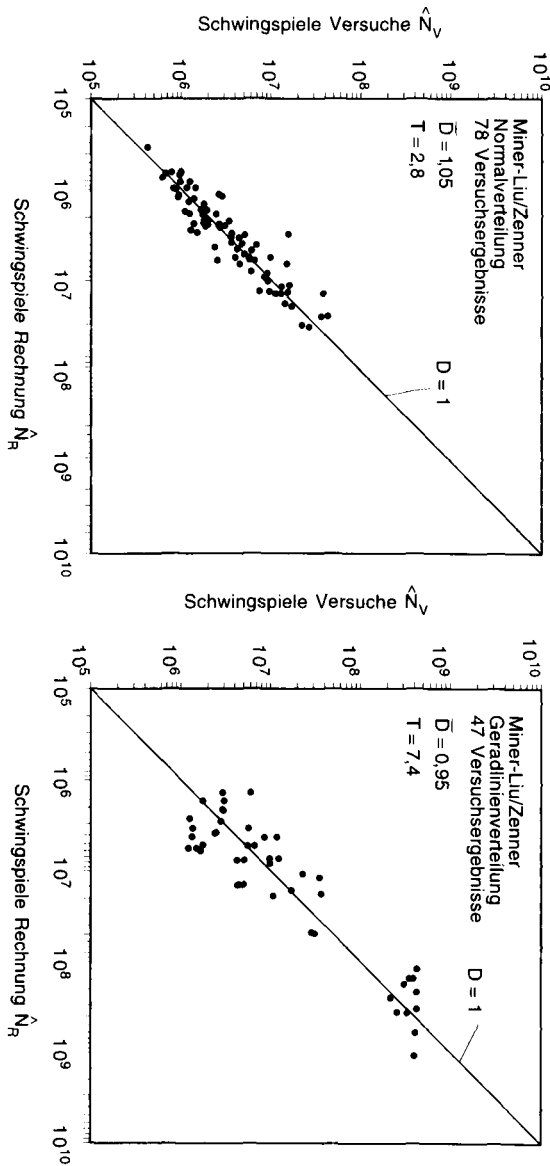


Bild 5:  
Vergleich zwischen berechneter Lebensdauer  $\hat{N}_R$  und Lebensdauer im Versuch  $\hat{N}_V$   
nach einer Modifikation von Liu und Zenner für Zufallsbeanspruchungen



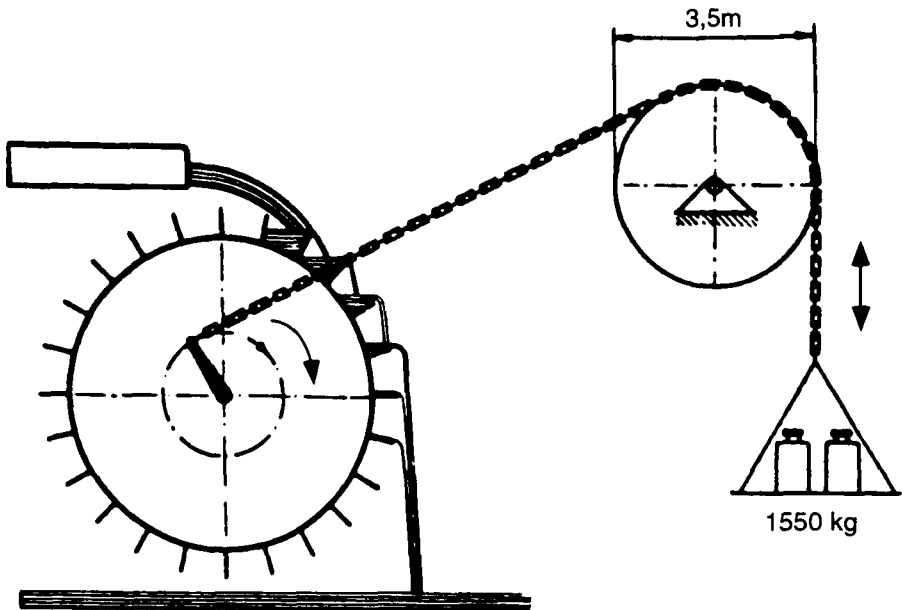


Bild 6:

*Julius Alberts Dauerprüfeinrichtung von Ketten, schematisch (ca. 1829).*

*Die Beanspruchung der Kettenglieder erfolgt vor allem durch Biegung über die Seiltrommel.*

Für die Region Braunschweig mag es interessant sein, daß nach heutigem Wissen die ersten Ermüdungsversuche überhaupt im Oberharz durchgeführt worden sind. Infolge der immer tiefer gehenden Schächte war die Haltbarkeit der „Eisenseile“, nach heutiger Terminologie der „Eisenketten“, nicht ausreichend, was zu zahlreichen Schäden führte. Julius Albert, Oberbergrat zu Clausthal, führte daraufhin Versuche an Ketten durch, bei denen die im Betrieb auftretenden Beanspruchungsverhältnisse genau reproduziert wurden, Bild 6. Die wesentliche Beanspruchung der Kettenglieder erfolgt durch Biegung beim Umlauf über die Seiltrommel. Wesentlich war, daß er der Größe und Häufigkeit der Belastungen besondere Aufmerksamkeit schenkte, Bild 7. Albert berichtete selbst über diese Versuche, die Ende der 20er Jahre des vorigen Jahrhunderts durchgeführt worden sind („Die Bergwerks-Verwaltung des Hannoverschen Ober-Harzes in den Jahren 1831–1836“). Interessant ist, daß die Ergebnisse dieser Untersuchungen zu der Aussage führten, daß bei der damaligen Technologie des Schmiedens (Schweißen) eine Herstellung sicherer Ketten nicht möglich sei. Er fand zugleich die Lösung, in einer neuen, vorteilhaften Art Drahtseile zu wickeln, die sich schnell in alle Welt verbreitete. Das Drahtseil kann als Paradebeispiel für eine fail safe-Bauweise gelten, bei der, im Gegensatz zu einer Kette, mehrere Lastpfade vorhanden sind, so daß bei Reißen eines Drahtes noch kein Bruch des Seiles auftritt. Das Reißen eines einzelnen Drahtes kann aber durch Inspektion rechtzeitig erkannt werden.

**VII.****Ueber Treibseile am Harz.**

Von

**Herrn Ober-Bergrath Albert**  
zu Clausthal.**Größe und Häufigkeit der Beanspruchung:**

"Zur Erklärung schien mir nichts übrig zu bleiben, als die Hypothese aufzustellen, dass eine Gelenkbiegung des Seils unter einem der Seil- und Förder-Last gleichen Drucke –also etwa 30 Ctr.– der Wirkung eines harten kalten Hammerschlages gleich seyn und mithin dadurch eine Härtung des Gliedes an der Druckstelle eben so eintreten müsse, wie man bekanntlich durch kaltes Hämmern alles Eisen federhart machen könne. Eine aufgestellte Berechnung ergab, dass bei den 14725 Malen, welche sich jedes betreffende Glied während des Statt gehabten Gebrauches ganz hatte herumdrehen müssen, etwa 93120 Biegungen jeder Gelenkstelle unter dem bemerkten starken Drucke auf beiden Scheiben, dem Korbe und oben im Schachte, Statt gehabt hatten."

Die

**Bergwerks - Verwaltung**  
des**Hannoverschen Ober-Harz**

in den Jahren 1831 – 1836.

Von

**Albert,**  
K. u. L. Bergmeister am Ober-Harz, Raths u. s. w.Es ist besonderer Abdruck aus Bd. X. des Archives für Mineralogie,  
Gesteine, Bergbau und Hüttenwesen.**Experiment:**

"Nach jener Hypothese musste also unter ähnlichen Einwirkungen immer derselbe Erfolg entstehen.

Diese Meinung wurde sehr bestritten, und da von ihrer Richtigkeit der Entschluss über alle ferneren Maassregeln abhing, so blieb nichts übrig, als den Beweis praktisch zu versuchen. Es wurde zu diesem Zweck im Anfang des Jahres 1829 eine bewegliche zwölfbüssige Scheibe mittelst Krummzapfens an ein stets im Gange befindliches Kehrreel gekoppelt. Über die Scheibe wurde ein Stück Seil gelegt, dessen Glieder aus dem ausgesuchtesten zähesten, fadigsten Gewehr-laufplatinen-Eisen mit Sorgfalt durch den sehr geschickten Bergschmidsmeister Angerstein jun. angefertigt waren. Am Ende dieses Seilstückes hing eine mit 30 Ctr. beschwerte Wagschale."

*Bild 7:**Auszug aus einer Veröffentlichung Julius Alberts*

Prof. Dr.-Ing. H. Zenner  
Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal  
Leibnizstraße 32 · 38678 Clausthal-Zellerfeld